

折叠波导结构的THz振荡辐射源研究

吴振华, 张开春, 刘盛纲

(电子科技大学物理电子学院太赫兹研究中心, 四川成都 610054)

摘要: 以折叠波导为基本结构的真空电子器件, 具有大功率、宽频带和制造成本低等优点, 本文通过深入研究折叠波导振荡器的冷腔结构、色散方程和耦合阻抗, 给出了可以产生THz的折叠波导振荡器的基本结构. 并利用三维PIC粒子模拟软件进行了三维模拟计算, 结果显示, 在输入电子注电压为20.6kV, 电流为0.12A, 磁场为3000高斯时, 可得到频率为0.1THz, 平均输出功率174W, 互作用效率大于7%.

关键词: 折叠波导; 太赫兹; 色散

中图分类号: TN122 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2009)12-2677-04

Research of THz Folded Waveguide Oscillator Radiation Source

WU Zhen hua, ZHANG Kai chun, LIU Sheng gang

(Terahertz Research Center, School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 610054, China)

Abstract: Folded waveguide structures are potential compact sources of high power terahertz radiation. We present feasibility studies of an oscillator, the fundamental theory including dispersion and coupling impedance are given. The geometry at 0.1THz is designed by theory and software, and the structure is simulated with 3D PIC code. The results are presented, a 175 W output power at 0.1THz is observed, the interaction efficiency is over 7%, while an electron beam of voltage 20.6kV, current 0.121A is injected, and the magnetic field is 3000 gauss.

Key words: folded waveguide; terahertz; dispersion

1 引言

近年来在生物、医药、航空安全检查等方面的研究中, 对太赫兹波的需求越来越强烈, 世界范围内很多实验室、大学等机构都积极进行太赫兹源的研究, 然而由于其特殊的频率, 产生太赫兹辐射很困难, 因而太赫兹源也十分匮乏, 形成了太赫兹波应用研究的一大瓶颈. 因此, 如何得到高功率的太赫兹源是现代太赫兹波技术应用亟待解决的问题, 传统的太赫兹辐射源是由激光直接或间接产生的, 主要包括自由电子激光器、气体激光器、半导体激光器和基于低温QCL半导体材料的太赫兹辐射源, 自由电子激光器装置庞复杂, 而其它器件的功率都在微瓦量级, 很难满足实际应用. 基于真空电子学的太赫兹辐射源在功率上是其它类太赫兹辐射源无法超越的, 太赫兹回旋管可以产生较大功率的微波, 但是需要很大的磁场, 体积大, 利用Smith-Purcell效应、Cherenkov效应和表面等离子体波产生太赫兹的辐射源, 可以做到小型化、大功率的要求, 但是其结构较为复

杂, 给加工带来一定难度, 而折叠波导振荡器不仅具有大功率, 体积小等有点, 且由于其结构简单, 采用全金属结构, 这使它比其它器件在设计加工上有很大的优越性, 也使它具有散热效果好, 高频损耗小, 耦合匹配好, 制造成本低等优势; 随着微加工技术的发展, 折叠波导将成为极具发展潜力的大功率太赫兹辐射源. 威斯康星大学研制的折叠波导振荡器, 频率为560GHz, 输出功率为 $56\text{mW}^{[1]}$. Northrop Grumman公司设计了在80100GHz频率范围内, 100W、30dB的折叠波导行波管^[2]. Litton公司研制的折叠波导行波管, 在Ka波段峰值功率达到800W, 单位长度增益为 $3.94\text{dB/cm}^{[3]}$, Litton公司还研制了平均功率为250W的W波段行波管^[4]. 韩国首尔国立大学物理天文学院真空电子实验室也研制了折叠波导行波管^[5]. 国内东南大学^[6]、北京大学^[7], 也对折叠波导进行了研究. 折叠波导结构所展现的优点和现有世界各国的研究成果表明, 折叠波导将是解决太赫兹波源匮乏问题的途径之一, 鉴于此我们开展了这项研究.

2 冷腔分析

2.1 色散特性研究

折叠波导的基本色散关系^[8,9]可以由式(1)给出

$$v_{ph} = \frac{\omega}{\beta_{z,m}} \quad (1)$$

式中 v_{ph} 是电子观察到波的轴向有效传播速度, ω 为波的角频率, $\beta_{z,m}$ 为第 m 次空间谐波的相位常数, $\beta_{z,m} = \frac{\Delta\phi_{z,m}}{p}$ (p 为周期长度, $\Delta\phi_{z,m}$ 为电子注观察到的电路每个周期 m 次空间谐波的相移).

$$\Delta\phi_{z,m} = (\Delta\phi + \pi) + 2m\pi \quad (2)$$

式中 $\Delta\phi$ 为折叠波导每个周期的相位变化, $\Delta\phi = \beta_0 p$, 式中 β_0 为轴向相位常数,

$$\beta_0 = \frac{\omega}{v_0} \quad (3)$$

$v_0 = \frac{p}{L} \frac{c}{\sqrt{1 - (\omega_c/\omega)^2}}$ 为波的轴向传播的速度 (c 是光速, L 为一个周期内波导的长度).

设定折叠波导电路中传输的主模为 TE_{10} 模, 波导的截止频率为:

$$\omega_c = \frac{\pi c}{a} \quad (4)$$

式中 a 为波导的宽边长度.

将式(2)~(4)代入到式(1), 式(1)可以表示为:

$$v_{ph,m} = \frac{p}{L} \frac{c}{\sqrt{1 - (\omega_c/\omega)^2 + \pi c/\omega L + 2\pi m c/\omega L}} \quad (5)$$

进一步处理式(5)可以得到 ω 与 β 的关系,

$$\beta_{z,m} = \frac{L \sqrt{\omega^2 - \omega_c^2 + (1 + 2m)\pi c}}{pc} \quad (6)$$

式(6)就是折叠波导的色散方程, 这个色散方程不包含折叠部分和电子通道对波速的影响, 可以使用等效电路法或场论较为复杂的方法得到更加精确的色散方程, 同时, 尽管式(6)较为简单, 但仍然可以得到可靠的色散关系.

2.2 耦合阻抗

从慢波结构基本理论可知, m 次空间谐波有效纵向耦合阻抗为:

$$K_{z,m} = \frac{|E_{z,m}|^2}{2\beta_{z,m}^2 P} \quad (7)$$

式中 $E_{z,m}$ 为电子注通过的位置上的纵向电场幅值, P 为通过慢波系统的功率流,

$$P = Wv_g \quad (8)$$

式中 W 为慢波线上单位长度的储能, v_g 为群速. 降低慢波系统中的储能或降低电磁波群速, 可以提高耦合阻抗, 同时相速与群速之间是有联系的, 可以表示为:

$$v_g = \frac{d\omega}{d\beta} = \frac{v_p}{1 - \frac{\omega}{v_p} \frac{dv_p}{d\omega}} \quad (9)$$

由式(8)可以反映出具有强烈色散慢波系统的耦合阻抗较高. 另一方面, 色散越强烈, 电子流能与之近似同步的频率范围就越窄, 即频带越窄, 耦合阻抗与带宽两者往往是矛盾的.

折叠波导耦合阻抗可以用下式来表示^[10],

$$K_{z,m} = K_{TE10} \frac{1}{(\beta_{z,m} p)^2} \left[\frac{\sin\left(\frac{\beta_{z,m} b}{2}\right)}{\frac{\beta_{z,m} b}{2}} \right]^2 \frac{I_0^2(k_m r)}{I_0^2(k_m R)} \quad (10a)$$

$$K_{TE10} = \frac{b}{a} \frac{\eta_0}{\sqrt{1 - \omega_c^2/\omega^2}} \quad (10b)$$

$$k_m^2 = \beta_{z,m}^2 + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \quad (10c)$$

式中 r_b 为电子注半径, b 为波导的窄边长度, 自由空间波阻抗 $\eta_0 \approx 377 \Omega$, K_{TE10} 为 TE_{10} 模的特性阻抗, I_0 为修正贝塞尔函数.

3 模拟计算

3.1 冷腔设计

考虑加工难度和实验条件, 选用工作电压为 20kV, 电子枪采用非会聚热阴极电子枪, 电流发射密度选用 $100A/cm^2$. 应用 CST 模拟软件进行冷腔设计分析, 得到需要的色散曲线和电子注区域电场, 图 1 为折叠波导的基本结构和参数表示, 表 1 为优化后的设计频率为 0.1THz 的折叠波导结构参数.

结构参数	数值
p	0.8mm
L	3.1mm
a	1.8mm
b	0.3mm

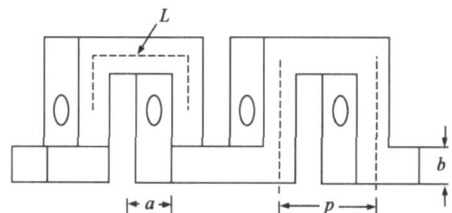


图1 折叠波导基本结构

图 2 为利用式(6)和模拟软件所得的色散曲线, 波导折叠部分的影响可以忽略. 图 1 中电子注与色散曲线的

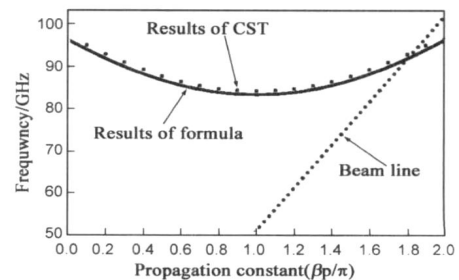


图2 色散曲线

关系表明, 电子束同波导中的前向波相互作用. 图 3 为工作点的冷腔电场分布图. 模拟表明工作点的耦合阻抗随电子注半径变化, 其值在 $10\Omega - 20\Omega$ (方点线为 CST 结果, 实线为式(6)的结果, 圆点线为电子注曲线), 两者存在微小差异, 其差异由波导折叠部分所引起, 由此可见 Ω 之间变化, 电子注半径越大, 耦合阻抗越大.

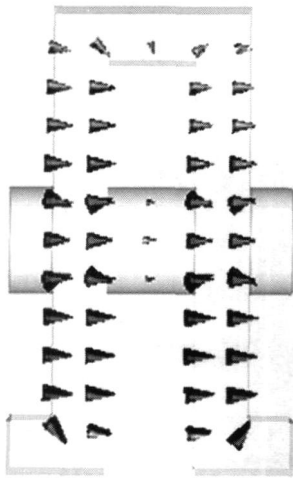


图3 工作点冷腔电场分布图

3.2 热腔模拟

采用 3D 粒子模拟软件进行模拟计算, 通过对周期数、电压和电流进行优化, 找到相应的最佳数值. 图 4 所示为输出功率随电压变化的曲线图, 当电压为 20.6kV 时, 输出功率达到峰值. 图 5 为输出功率随周期个数 n 的变化曲线图, 周期个数 (即相互作用长度) 会影响到输出微波的功率, 周期过少, Q 值低, 则相互作用强度不够, 周期过多, 则相互作用过长, 会发生过群聚, 当周期个数为 20 时输出功率达到最大. 另外, 电流对输出功率的也有一定的影响, 一方面, 输入电流过小, 电子注不会起振, 另一方面, 要考虑实际实验当中的阴极发射能力, 图 6 为输出功率随电流的变化曲线图, 在图 6 所示的电流范围, 输出功率随电流线性变化.

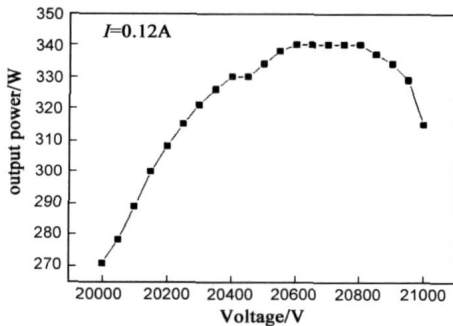


图4 输出功率随电子注电压变化曲线图

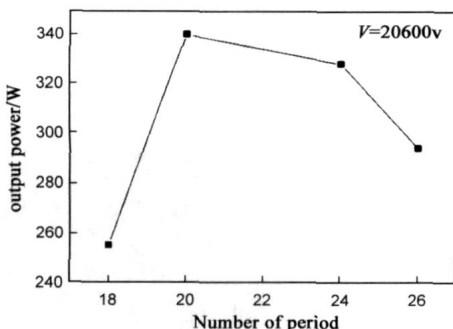


图5 输出功率随周期个数n的变化曲线图

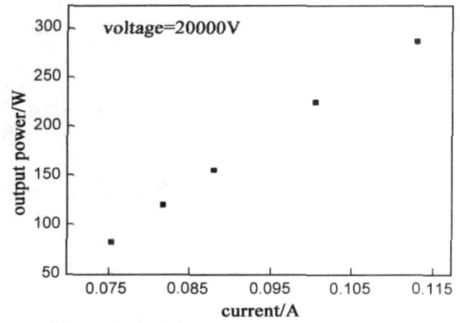


图6 输出功率随电流的变化曲线图

图 7~ 11 为在电子注电压为 20.6kV, 电流为 0.12A, 周期 n 为 20, 磁场为 3000 高斯条件下的模拟结果, 图 7 为腔体中某一点的电场随时间变化曲线图, 图 8 为电子注群聚图, 电子注在 25ns 时完全起振, 图 9 为起振后的电子注相空间图, 图 10 为电流随时间的变化图, 图 12 为腔体中微波的频率随时间的变化图, 图 11 为输出功率图, 输出功率为 174W, 互作用效率为 7%, 图 12 为输出功率的频谱图, 其频率为 0.1THz, 这大于冷腔工作点频率, 其原因是电子注影响了结构中的电场分布.

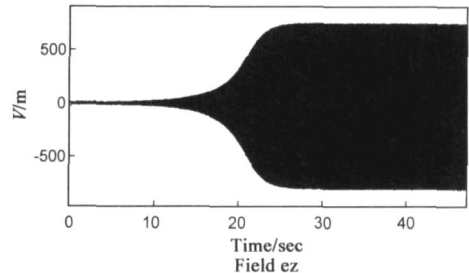


图7 腔体中某一点的电场随时间变化曲线图

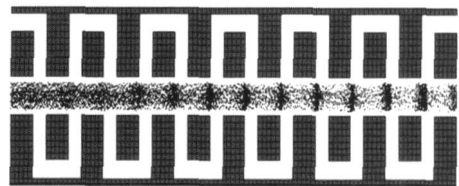


图8 电子注群聚图

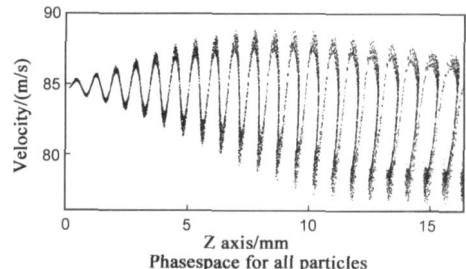


图9 起振后的电子注相空间图

比较图 7 和图 12, 腔内电场同输出口电场起振时间同步, 且腔内电场的频谱与图 13 相同, 这说明输出的电磁波正是腔体所产生的, 是可持续的, 稳定的. 图 8 中群聚电子团的周期同腔体周期对应, 也说明此时工作在最佳状态.

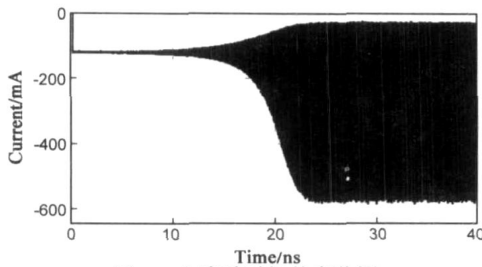


图10 电流随时间的变化图

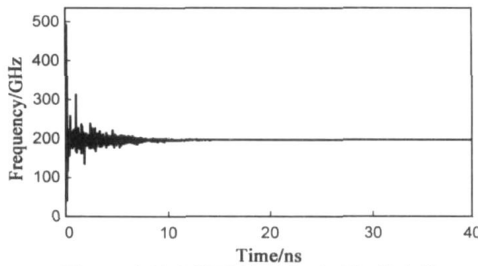


图11 腔体中微波的频率随时间的变化

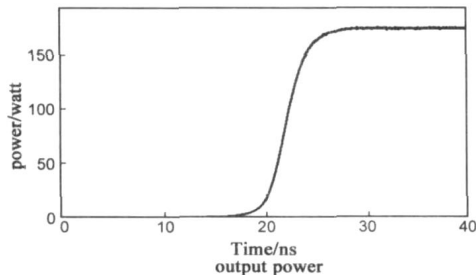


图12 输出功率图

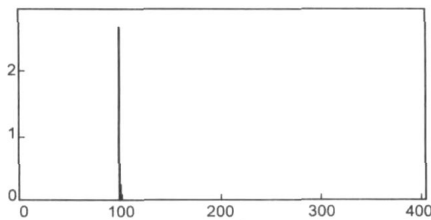


图13 输出波频谱图

4 微加工技术

折叠波导的加工存在着一定的难度,国际上一般采用 LIGA^[5]、DRIE(deep reactive ion etching)等技术来解决这一难题.我国在科技部、国家自然科学基金委,教育部和总装备部的资助下,积极开展 MEMS 的研究,国内的微加工技术也有长足的发展,很多单位的加工技术都能达到微米量级,可以满足对 0.1THz 折叠波导的加工要求.

5 小结

本文分析了折叠波导 THz 辐射源的色散方程和耦合阻抗,并借助 CST 软件进行了冷腔计算,对结构参数进行了优化,在电子注电压为 20.6kV,电流为 0.12A 时,周期 n 为 20 时,进行 3-D 粒子模拟软件,得到了频率为 0.1THz,平均功率为 175W 的微波输出,相互作用效

率达到 7%.在完成热腔模拟后,准备进行相应实验,电子枪采用非会聚的圆柱型电子枪,磁场采用永磁,实验时电子枪、腔体浸没在磁场中.

参考文献:

- [1] S Bhattacharjee, C L Kory, W J Lee, et al. Comprehensive simulations of compact THz radiation sources using microfabricated, folded waveguide TWTs[A]. Vacuum Electronics Conference, IVEC 2002. Third IEEE International[C]. USA: 2002. 26– 27.
- [2] Theiss A J, et al. An Integral Polepiece Folded waveguide Slow-Wave Circuit for High-power Millimeter Wave TWTs [A]. IEDM1993 [C]. Washington, DC: IEEE, 1993. 149– 151.
- [3] Gallagher D, et al. Millimeter-Wave Folded Waveguide TWT Development at Northrop Grumman[A]. IEDM1997 [C]. San Diego, CA: IEEE, 1997. 161.
- [4] Lyon D B, et al. Litton Folded Waveguide High-power Millimeter Wave TWTs[A]. IDEM 1994 [C]. San Francisco, CA: 1994. 918– 920.
- [5] Seong Tae Han, Gur Sik Park, et al. Low-voltage operation of K-band folded waveguide traveling wave tube [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004, 32(1,): 60– 66.
- [6] Liu Shunkang. A new type of millimeter wave high power devices folded waveguide TWTs[J]. Journal of Electron Devices, 2001, 24(2): 158– 161.
- [7] ZHU Zhenpeng. Research on cold characteristics of bulk micro-machined folded waveguide slow-wave structure [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(5): 1757– 1760.
- [8] R G E Hutter, S W Harrison. Beam and Wave Electronics in Microwave Tubes[R]. New Jersey: D V an Nostrand Company, Inc, 1960.
- [9] Seong Tae Han, Kyur Ha Jang, et al. Low voltage operation of K-band folded waveguide traveling wave tube [J]. IEEE Transaction on Plasma Science, 2004, 32(1): 60– 66.
- [10] John H Booske. Accurate parametric modeling of folded waveguide circuits for millimeter wave traveling wave tubes [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2005, 52(5): 685– 694.

作者简介:



张开春 男,1972 年生于四川广元.中级职称,主要从事太赫兹源器件的研究等.

吴振华 男,1980 年生于河南郑州.电子科技大学博士研究生,主要从事太赫兹源器件的研究等. E-mail:wuzhenhua@uestc.edu.cn